

窑洞开挖诱发浅层黄土滑坡的变形机理模拟

陈春利¹, 殷跃平², 李同录¹

CHEN Chun-li¹, YIN Yue-ping², LI Tong-lu¹

1. 长安大学地质工程系, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质环境监测院, 北京 100081

1. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China

摘要:由废弃窑洞倒塌引发的黄土边坡失稳严重威胁了黄土高原地区居民的生命财产安全。通过野外调查,选取陕西省延安市三亩台滑坡为典型案例,基于室内试验分析了窑洞废弃、依窑建房等工况下黄土含水量和土体强度的变化规律,运用数值模拟研究了窑洞废弃、依窑建房过程中最危险滑面上的应力和强度变化趋势。从土体应力-强度关系角度揭示了废弃窑洞诱发黄土边坡变形破坏机理。研究表明,窑洞废弃和依窑建房增大了土体含水量,降低了土体的抗剪强度,致使坡体下部土体剪应力逐渐接近其抗剪强度,边坡的稳定性随之降低,最终窑洞坍塌引发滑坡。

关键词:黄土滑坡;窑洞;坡脚建房;三轴试验;变形机理;数值模拟

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2013)12-1962-06

Chen C L, Yin Y P, Li T L. Numerical simulation on the deformation mechanism of shallow loess landslides induced by deserted cave dwellings. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12):1962-1967

Abstract: There are lots of landslides triggered by deserted cave dwellings that threaten people's life and property safety in the loess area. With Sanmutai landslide in Yan'an as a study case, the authors detected the variation regularity of moisture content and strength of loess during the deserting of cave dwellings and the building of houses beside the cave dwellings through laboratory test. The stress and strength change on the most dangerous slip surface were studied and the mechanical mechanism of the development of deformation and the failure of loess landslide were revealed. The results show that the deserting of cave dwellings and the building of houses beside the cave dwellings would increase soil moisture content and reduce soil strength, making it nearly impossible for the stress distribution in the lower part of the slope to resist the shear stress and thus causing the collapse of cave dwelling and the occurrence of landslides.

Key words: loess landslide; cave dwellings; slope toe construction; triaxial test; deformation mechanism; numerical simulation

黄土高原沟壑纵横,大部分城镇位于黄土沟谷之中,宅基地缺乏,当地群众自古就形成了斩坡建窑的生活习惯^[1-4]。开挖窑洞使边坡陡立,临空面增大,也带来了安全隐患。仅在延安地区,2000—2004年发生的13处滑坡中就有10处与削坡建窑建房有关,错断式崩塌也多发育在窑洞顶部的土体中^[5]。因此,许多学者针对窑洞的环境工程问题、窑洞结构的设计、坍塌机理等方面开展了研究^[6-9]。

根据近期的地质灾害详查结果,随着黄土高原地区人民生活水平的日益提高,百姓开始弃窑洞而住平房,由于地形条件限制,为了充分利用有限的空间,常在紧邻挖有旧窑洞的边坡坡脚修建房屋,导致黄土边坡的稳定问题比窑居时代更加突出,已经有大量该类边坡破坏造成伤亡的事件。如2005年10月12日发生的陕西省延安市富县茶坊镇罗家塔行政村三亩台组滑坡,即为房后窑洞坍塌

收稿日期:2013-09-03;修订日期:2013-10-29

资助项目:国家自然科学基金项目(批准号:40972182和41102164)和国家“十二五”科技支撑项目课题(编号:2012BAK10B01)

作者简介:陈春利(1987-),女,在读博士生,从事地质工程和地质灾害研究。E-mail:chen_chunli@126.com

塌诱发的滑坡,造成 2 人死亡,毁房 9 间。这种依窑建房的工程存在极高的安全隐患,但在黄土地区类似的工况还有很多,严重威胁了坡脚住户的生命财产安全,因此,针对依窑建房诱发黄土滑坡的变形破坏机理进行深入研究具有重要意义。本文以陕西省延安市富县茶坊镇罗家塔行政村三亩台组滑坡为例,对该类黄土滑坡的发生机制进行分析和探讨。

1 滑坡概况

陕西省延安市富县茶坊镇罗家塔行政村三亩台组滑坡发生于罗家塔河一支流左岸,为二级阶地后缘,发生该滑坡的黄土梁高 33m,坡度约 50°。目前滑坡轮廓清楚,后壁陡立,高 2~5m,滑后形成锥形堆积体,锥形体高 26m,底边长 37m,滑体厚约 15m(图 1、图 2)。发生三亩台滑坡的黄土边坡上覆上更新统(Q_3)黄土,坡顶汇水条件差,下部为中更新统(Q_2)黄土,底部为河流二级阶地卵石层,厚 5~6m,卵石磨圆度好,无泉水出露。

据走访调查,发生该滑坡的斜坡坡脚原住 3 户居民,在 Q_2 黄土中挖有 4 孔窑洞,窑洞深 6m,跨度 3m,高 2.5m。在滑坡发生前窑洞已废弃多年,紧邻窑洞建有一排民房(图 3),滑坡发生前坡顶未见开裂现象。该滑坡发生速度极快,属快速错落式^[10],滑坡突然发生滑动导致窑洞及窑前房屋全部损毁。

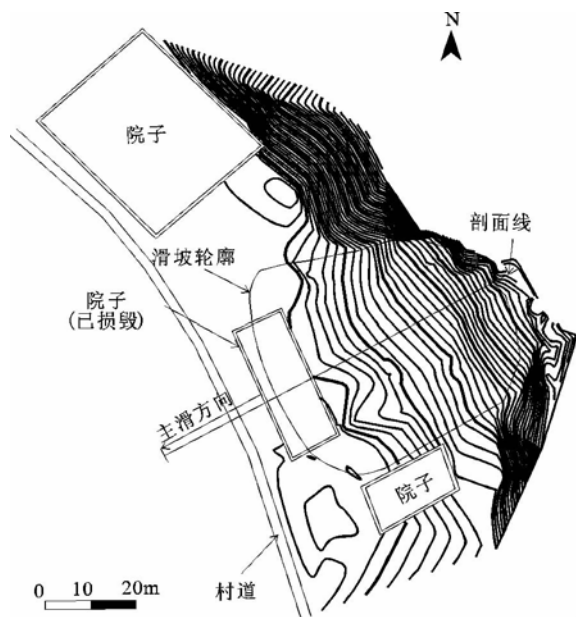


图 1 三亩台滑坡地形

Fig. 1 Geographic contour map of Sanmutai landslide

2 岩土物理力学性质及计算参数

三亩台滑坡滑体为 Q_3 — Q_2 黄土,下伏河流二级阶地卵石层。分别在滑坡后壁开挖探槽采取原状土样,通过室内试验测得物理力学性质指标如表 1 所示。

窑洞冬暖夏凉,但同时也存在通风不良、潮湿阴暗等缺点,由于窑洞壁温度较低,空气与之接触便会使壁面返潮^[11-12]。据对滑坡现场临近居民窑洞的调查,有的窑洞因为日常取暖做饭能保证土体干燥,但废弃已久的窑洞吸潮明显,紧邻坡脚建房后房屋遮光、阻水、挡风,会导致后排窑洞内更加阴暗潮湿。分别测试正常居住窑洞(干燥)、窑洞废弃(稍湿)、坡脚建房遮光挡风(潮湿)3 种状态下黄土的含水量,并在现场取原状土样,分别采用风干法和滴定法^[13]将 Q_2 黄土配制成与之对应的干燥、稍湿、潮湿 3 种含水状态,并补充一组饱和黄土试样,分别做不同围压

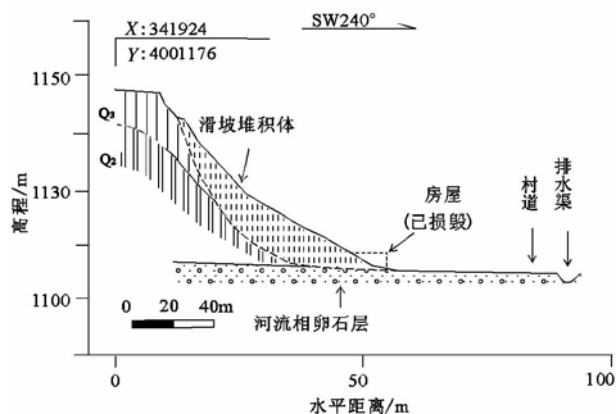


图 2 三亩台滑坡地质剖面

Fig. 2 Main profile of Sanmutai landslide

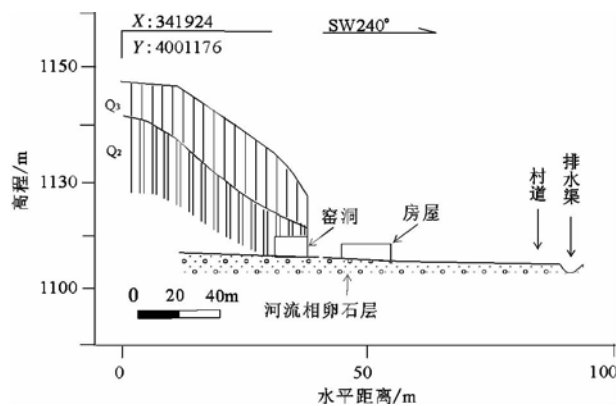


图 3 三亩台滑坡滑前剖面

Fig. 3 Main profile of Sanmutai landslide before sliding

表 1 土样的基本物理力学性质参数
Table 1 Physical parameters of soil samples

土样	比重	容重 γ	含水率	塑限	液限	塑性	液性	孔隙	弹性模量	泊松比	粘聚力	内摩擦角
	G_s	$kN \cdot cm^{-3}$	$\omega/\%$	$\omega_p/\%$	$\omega_l/\%$	指数 I_p	指数 I_L	比 e	E_s/MPa	ν	c/kPa	$\varphi/^\circ$
Q ₃ 黄土	2.71	17.2	9.5	20.3	34.2	13.90	-0.77	0.981	55	0.30	60	17
Q ₂ 黄土	2.71	15.3	11.2	22.8	37.0	14.21	-0.63	0.972	70	0.30	67	20.1
卵石层		28.0							1080	0.28	0	34.0

状态下的三轴压缩试验.研究三轴压缩试验条件下黄土的强度特性 (表 2),以便在分析该滑坡失稳机理时,精确考虑黄土含水率变化对边坡稳定性的影响。

通过三轴压缩试验发现,随含水量的增大,Q₂黄土的抗剪强度呈降低趋势。绘制有效粘聚力、有效内摩擦角与含水量的关系曲线(图 4、图 5),发现含水量对有效粘聚力的影响显著,即随含水量的增大有效粘聚力减小,符合指数关系 ($C'=191.75e^{-0.0929\omega}$, $R_2=0.9612$),有效内摩擦角则受含水量变化影响较小。

3 三亩台滑坡变形机理模拟

3.1 分析方法

边坡滑移破坏是沿特定的剪切面发生的,因此沿剪切破坏面上的应力和应变是反映边坡变形破坏的主要物理量。根据摩尔-库仑强度理论,剪切破裂面和最大主应力夹角 α 为 $45^\circ \pm \varphi/2$ ^[14](图 6)。对于二维平面应变问题,可推导潜在破裂面上正应力和剪应力的大小:

$$\sigma_\alpha = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_y - \sigma_x)^2}{4} + \tau_{xy}^2} \cos(2\alpha)$$
$$\tau_\alpha = \sqrt{\frac{(\sigma_y - \sigma_x)^2}{4} + \tau_{xy}^2} \sin(2\alpha)$$

式中: σ_α 为破裂面上的正应力, τ_α 为破裂面上的剪应力, τ_f 为抗剪强度, c 为粘聚力, φ 为内摩擦角, α 为

表 2 各含水状态下黄土试样强度参数
Table 2 Physical parameters of soil samples under different conditions

黄土状态	干燥	坡前建窑	废弃窑洞内	饱和
试验含水量 $\omega/\%$	3.2	11.2	21.5	31.2
有效粘聚力 c'/kPa	160	67	19	13
有效摩擦角 $\phi'/^\circ$	22.6	20.1	20.1	22.6
容重/ $kN \cdot m^{-3}$	14.90	16.17	17.25	18.72

最大主应力夹角, σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} 分别为有限元法求得各单元的应力分量。

由此可见,利用有限单元法求出应力分量 σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} ,即可以求得破裂面上的正应力 σ_α 和剪应力 τ_α ,便可进一步分析三亩台滑坡最危险滑面上正应力、剪应力和抗剪力的分布。

3.2 计算模型

为了反映窑洞开挖-窑洞废弃-窑前建房过程中滑坡的孕育发展过程,根据边坡地质剖面及实测地形,沿主滑方向建立天然边坡、人工切坡和坡脚建窑 3 个有限元计算模型(图 7),计算模型的介质材料划分为 Q₃黄土、Q₂黄土和卵石层 3 种基本类型,

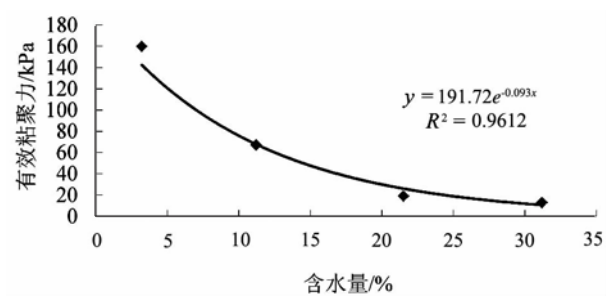


图 4 有效粘聚力 C' 与含水量 ω 关系曲线
Fig. 4 Effective cohesive force versus moisture content curves

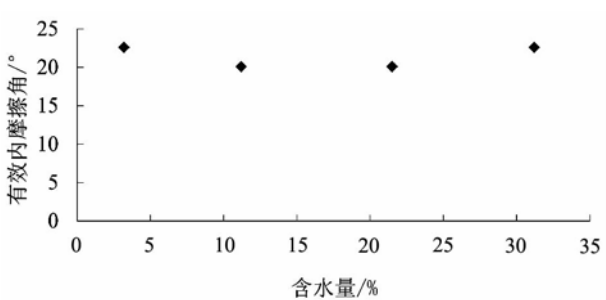


图 5 有效内摩擦角 φ' 与含水量 ω 的关系
Fig. 5 Effective angle of internal friction versus moisture content curves

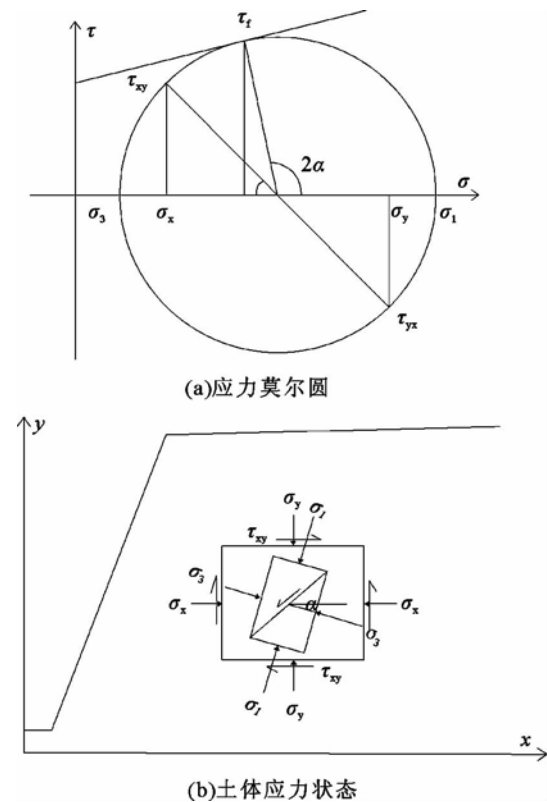


图 6 边坡中土体应力分量和主应力的关系
Fig. 6 Mohr circle showing state of stress at element in slope

具体参数取值见表 1。根据现场调查结果,分别考虑 Q_2 黄土在窑洞住人、窑洞废弃、窑前建房等黄土含水量不同时的土体强度(表 2),采用 GTS 有限元软件分别计算天然边坡、人工斩坡、斩坡建窑、窑洞废弃和坡前建房 5 种工况下边坡的稳定性(表 3)。在 3 个计算模型中均选取 2 条典型剖面,剖面 I 为窑洞中轴线方向剖面,剖面 II 位于两窑洞间(为了方便对比,天然边坡和人工斩坡工况下也选取相同位置剖面),分别计算各工况下两剖面滑动面上的正应力、剪应力和抗剪强度,见图 8—图 12(图中横坐标表示剖面方向潜在滑面的长度,由于窑洞开挖后部分临空,图 10—图 12 中窑顶处最危险滑面长度缩短为 22.1m)。

3.3 结果分析

通过稳定性计算发现(表 3),开挖前斜坡稳定性较高,人工斩坡、坡脚挖窑等人类活动降低了边坡稳定性,但边坡仍处于稳定状态。窑洞废弃日久则黄土吸潮,导致边坡稳定系数进一步降低至 0.99,边坡处于临界状态。紧邻窑洞建房后,房屋遮光、阻水、挡风使窑洞土体含水量进一步增大,此时

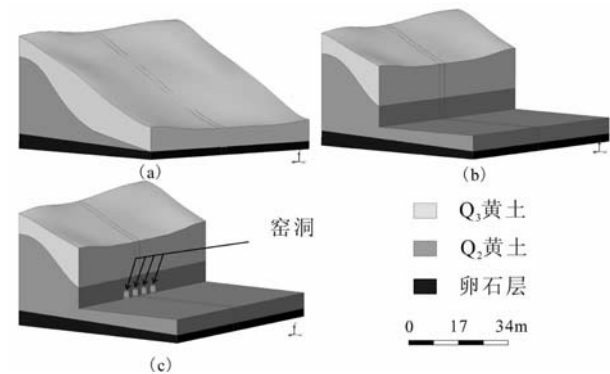


图 7 三亩台滑坡三维模型
Fig. 7 Finite element models of Sanmutai landslide
a—天然边坡;b—人工斩坡;c—坡脚建窑

边坡的稳定性进一步降低,边坡发生失稳。

由 GTS 软件三维有限元模拟结果可以看出,人工开挖前 2 条剖面的应力分布基本一致,沿最危险滑面自坡顶至坡脚方向正应力和剪应力逐渐增大,剪应力远低于抗剪强度(图 8)。

垂直斩坡后,2 条剖面均发生了应力重分布,其应力变化趋势仍保持基本一致,在最危险滑面上部,沿最危险滑面向下正应力、剪应力缓慢增大,滑面下部应力较天然边坡略有降低,这是由于开挖后临空面卸荷作用导致的,此时最危险滑面上剪应力始终低于抗剪强度(图 9)。

图 10 显示,坡脚挖窑后,剖面 I 上最危险滑面上中部正应力、剪应力基本与建窑前保持不变,距临空面 10m 范围内正应力、剪应力略有降低,这是由于窑洞开挖促使局部土体卸荷;而剖面 II 中上部应力较窑洞开挖前变化不大,临空面附近剪应力则略有升高,这是由于窑洞开挖造成两窑间土体出现应力集中;两条剖面最危险滑面上剪应力较开挖窑洞前均更接近抗剪强度。

根据现场调查,窑洞废弃后土体含水量显著增大,分析窑洞废弃后边坡的稳定性采用坡脚建窑的三维模型(图 7-c),但窑洞部分土体参数采用室内试验测得的窑洞稍湿状态下的力学参数(表 2)。由

表 3 三亩台滑坡各工况稳定系数
Table 3 Stability factors of Sanmutai landslide under different working conditions

边坡状态	天然状态	人工斩坡	斩坡建窑	窑洞废弃	坡前建房
稳定系数	1.99	1.74	1.14	0.99	0.91

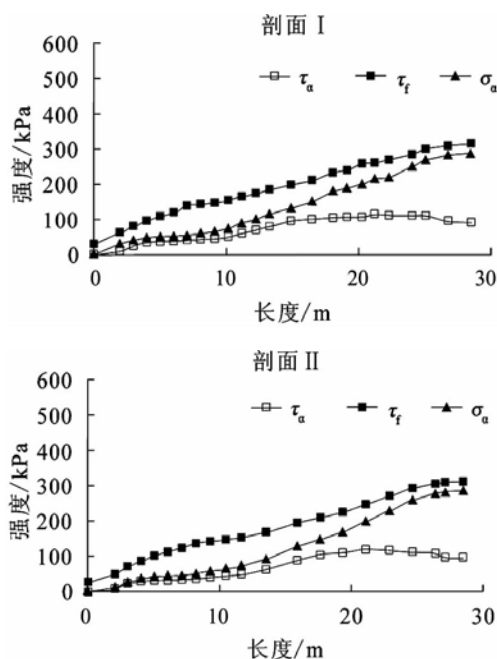


图8 天然边坡最危险滑面上应力分布

Fig. 8 Stress distribution on the slip surface before excavating

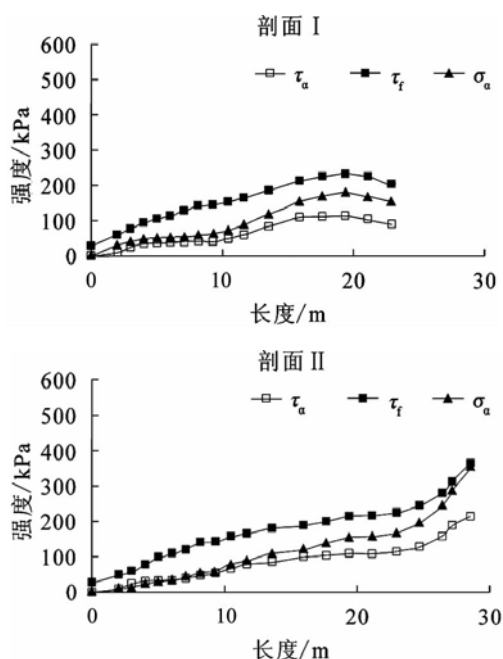


图10 建窑后最危险滑面上应力分布

Fig. 10 Stress distribution on the slip surface after construction of cave dwellings

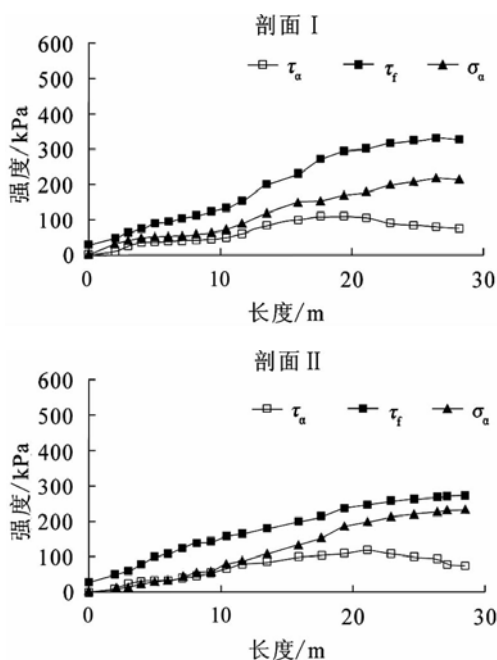


图9 斩坡后最危险滑面上应力分布

Fig. 9 Stress distribution on the slip surface after excavating

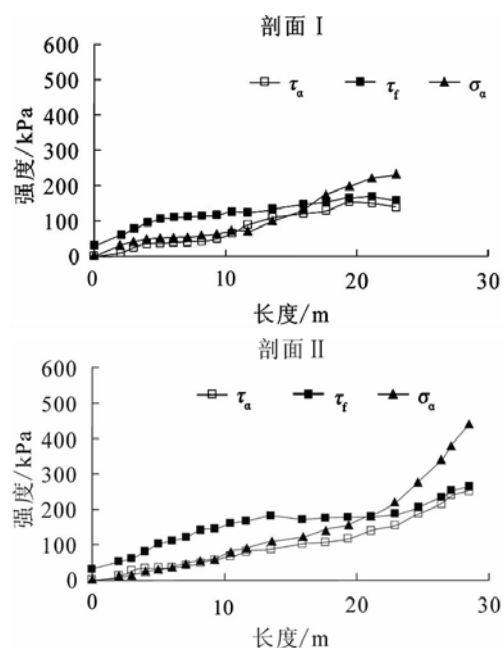


图11 窑洞废弃后最危险滑面上应力分布

Fig. 11 Stress distribution on the slip surface when the cave dwellings are deserted

于窑洞土体含水量增加,土体容重增加,剖面 I 可见最危险滑面中下部正应力较图 10 略有增长,同时土体含水量增加导致土体强度降低,最危险滑面下部剪应力更加接近抗剪强度;而剖面 II 上应力显示,窑

洞影响范围内土体正应力和剪应力急剧增大,最危险滑面中部剪应力接近抗剪强度。

在窑前建房后,房屋遮光、阻水和挡风使窑洞土体更加潮湿,有限元计算模型仍采用坡脚建窑三维模

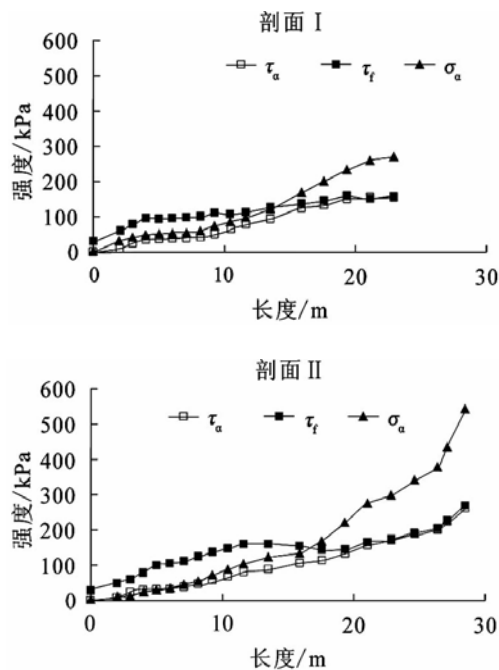


图12 窑前建房后最危险滑面上应力分布

Fig. 12 Stress distribution on the slip surface when there is house building beside cave dwellings

型(图7-c),采用室内试验测得的窑洞潮湿状态下的力学参数进行计算(表2),剖面Ⅰ抗剪强度进一步下降,最危险滑面中下部剪应力超过抗剪强度;剖面Ⅱ抗剪强度降低,最危险滑面中部剪应力超过抗剪强度,此时土体发生剪切破坏,边坡失稳(图12)。

通过对比各工况下对应位置的应力分布可知,开挖窑洞前2条剖面上应力分布基本一致,窑洞开挖后窑顶处产生开挖卸荷作用,而两窑间窑腿部分土体中则出现应力集中现象。2条剖面均显示,此类坡脚建窑和窑前建房工况下,由于土体含水量不断增大,最危险滑面中下部(窑顶上方区域)剪应力最先超过抗剪强度,导致窑洞坍塌,致使坡脚产生变形破坏,破坏区进一步延伸使得滑面贯通,上部坡体失去下部支撑后迅速滑落,最终导致滑坡的发生。

4 结 论

(1)含水量的变化直接影响黄土的强度,随含水量的增大中更新世黄土的有效粘聚力减小,其变化趋势符合指数关系,有效内摩擦角则受含水量变化影响较小。

(2)开挖前三亩台斜坡稳定性较高,人工斩坡、坡脚挖窑等人类活动降低了边坡稳定性,但边坡仍处于稳定状态。窑洞废弃后土体吸潮明显,若依窑洞建房,则窑洞会更加潮湿,黄土含水量增大不仅增加了土体自重和土体应力,同时降低了抗滑力,最终最危险滑面下部剪应力超过抗剪强度,窑洞坍塌引发滑坡。

(3)窑洞废弃和依窑建房是引发该类黄土滑坡的主要因素,但在黄土地区类似工况普遍存在,其安全性需要引起高度重视。建议对废弃窑洞进行妥善回填或增设加固支撑,依窑建房应保证建筑物与边坡坡脚有合理的避让距离,同时采取合理的疏水排水措施,保持边坡土体的干燥,以保证边坡的稳定性。

致谢:长安大学李萍副教授、中国地质科学院地质力学研究所李滨副研究员在实验及成文过程中给予了指导和帮助;长安大学张克亮、王阿丹和张亚国同学一同参与了野外调查,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]雷祥义.黄土高原地质灾害与人类活动[M].北京:地质出版社,2001.
- [2]张茂省,李同录.黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J].工程地质学报,2011,19(4):86-96.
- [3]刘小军,王铁行,韩永强,等.黄土窑洞病害调查及分析[J].地下空间与工程学报,2007,(6):996-999.
- [4]李滨,殷跃平,吴树仁,等.多级旋转黄土滑坡基本类型及特征分析[J].工程地质学报,2011,(5):703-711.
- [5]张茂省,孙传尧,等.延安市宝塔区地质灾害详细调查示范[J].西北地质,2007,(2):29-55.
- [6]雷祥义,魏青珂.陕北伤亡性黄土崩塌成因与对策研究[J].岩土工程学报,1998,(1):64-69.
- [7]任侠.黄土窑洞弹塑性有限元分析[J].兰州铁道学院学报,1993,(4):1-7.
- [8]张永双,张士运,曲永新,等.黄土高原北部窑害灾害的形成机理分析[J].地球学报,2004,(5):565-569.
- [9]廖红建,赵树德,高小育,等.西部黄土高原窑洞民居发展中的环境工程问题[J].西安交通大学学报(社会科学版),2000,(3):7-10,23.
- [10]李同录,龙建辉,李新生.黄土滑坡发育类型及其空间预测方法[J].工程地质学报,2007,15(4):500-505.
- [11]陈启高,陈永成,温永玲,等.民居窑洞防潮新方法的研究[J].地下空间,1989,9(4):66-70.
- [12]杨志威.浅议我国窑洞建筑的现状与未来[J].西北建筑工程学院学报,1990,3(4):130-140.
- [13]王铁行,罗少锋,刘小军.考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J].岩土力学,2010,31(8):30-34.
- [14]Abramson L W, Lee T S, Sharma S, et al. Slope Stability and Stabilization Methods, 2nd Edition[M]. New York: John Wiley and Sons Incorporated, 2002: 242-321.